干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

山西煤田生态系统服务热(冷)点时空格局

潘换换[1]， 吴树荣[1]， 杨琪雪[2]， 杜自强[1]， 武志涛[1]， 张 红[2]
（1. 山西大学黄土高原研究所，山西 太原 030006；2. 山西大学环境与资源学院，山西 太原 030006）

摘 要：基于山西煤田1986年和2015年的遥感、气象等数据，利用InVEST（Integrated valuation of ecosystem services and trade offs）模型估算其土壤保持和产水量服务、CASA（Carnegie-Ames-Stanford approach）模型估算植被生产服务、RWEQ（Revised wind erosion equation）模型估算防风固沙服务、热点分析模拟生态系统服务热（冷）点空间分布格局。结果表明：（1）1986—2015年，土壤保持服务热点区空间分布整体未发生大变化，冷点区主要从沁水煤田和霍西煤田向河东煤田转移；产水服务热点区在沁水煤田东部增加较明显，冷点区主要在河东煤田南部增多；植被生产服务热点区整体由沁水煤田南部向东北部移动，冷点区主要从西山煤田和沁水煤田向河东煤田和大同煤田移动；防风固沙服务热点区整体由西北部向东南部转移，冷点区主要从沁水煤田向霍西煤田和河东煤田转移。（2）1986—2015年研究区东南部的沁水煤田为多重生态系统服务热点区集中地，属于重点生态系统服务功能供给区；河东煤田和霍西煤田为多重生态系统服务冷点区变化集中区域。（3）耕地产水量和植被生产服务热点面积占比相对较高，其服务水平强于其他服务；林地和草地的土壤保持服务热点面积最大，属于土壤保持服务高功能区；建设用地的产水服务水平较高。

关 键 词：煤田；生态系统服务；热点分析；土地利用；空间格局
文章编号：

20世纪70年代，联合国大会发表的《人类对全球环境的影响》报告中首次提出生态系统服务的概念。1997年，Daily及Costanza等[1-2]开展了生态系统服务概念、分类、估算等方面的专题研究，使生态系统服务评估的原理与方法从科学意义上得以明确，也成为目前最有影响的生态系统服务价值的研究成果。此后，这一概念和理论迅速应用于不同尺度与不同类型生态系统的评估之中，也成为国际生态学领域的研究热点。热点这一概念最早在20世纪80年代由Norman Myers提出，最初主要用在生物多样性优先保护区方面[3]。随后，国内外学者对其概念在生态系统服务方面做了补充与完善，并引用到生态系统服务研究中。如Cao等[4]采用热点分析法和聚类算法确定了耕地保护优先权和功能区划；王壮壮等[3]以延河流域为例，利用多源数据模拟了土壤保持、植被碳固定、产水、洪水调节4种生态系统服务的热点与冷点时空格局变化特征。这些研究对区域生态系统服务热点识别和关键生态系统服务保护产生了重要的推动作用。

煤田是一个典型的环境脆弱区，对陆地生态系统作用显著，可以涵养水源，保持水土，还可以种植植被防风固沙等，进而给人类提供良好的生态环境。但由于各种人类活动的影响，生态环境遭到严重破坏[5]，拥有全国40%煤炭资源的山西煤田，其生态环境破坏尤为严重，地表沉陷影响人类生活，并且使得动植物失去其赖以生存的环境，开垦导致森林砍伐、土壤流失等[6-7]。目前，已有许多学者参与到生态系统服务的研究中，包括权衡与协同、生态

收稿日期：2020-12-25； **修订日期**：2021-04-14
基金项目：国家自然科学基金项目（U1810101，41871193，41977412）；2020年山西省研究生教育创新项目（020SY035）；山西省高等学校“服务产业创新学科群建设计划”（20181401）资助
作者简介：潘换换（1994-），女，在读硕士，主要从事植被与生态遥感研究. E-mail: phhsxdx@163.com
通讯作者：杜自强（1974-），男，博士，副教授，主要从事植被与生态遥感、土地变化科学、生态系统服务与人类福祉研究.
E-mail: duzq@sxu.edu.cn

系统服务价值、生态系统服务变化及其驱动因素等研究[8-14]，但对于煤田这一特殊的生态系统研究相对匮乏，也有部分学者从不同方面就矿产资源开发对生态环境的影响进行了研究，但大多只是从土地利用变化、植被净初级生产力(NPP)、归一化植被指数(NDVI)等时空变化来探究矿业生命周期对生态的影响程度[15]，而受到破坏的生态系统一般不能通过单一指标来全面反映。因此，生态系统服务中的多个生态服务功能必须基于多源数据综合量化评估，这样才能对矿区经济与环境发展、土地利用复垦决策等产生较大的指导意义[16]。

本文收集了山西6大煤田1986年和2015年的影像、气象等数据，采用GIS热点分析工具与空间分析方法分析与评价土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种生态系统服务，旨在为煤田土地复垦与生态重建提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西省煤炭资源充足，是中国重要的煤炭基地，世界5大煤炭主产地之一。山西煤田地处110°14′~114°33′E，34°34′~40°43′N，属于典型的大陆性气候，四季分明，年平均气温4~13 ℃，年平均降水量400~600 mm。全省自北向南分布有大同、宁武、河东、西山、霍西及沁水6大煤田，总面积53800 km^2，占山西省总面积近40%。煤炭开采虽给国民经济带来了极大的效益但却给区域生态环境带来了很大的破坏。煤田生态环境亟需改善以更好地受益于人类。

1.2 数据来源

本文使用多源数据集估算煤田生态系统服务，包括土地利用、气象、土壤、DEM高程等数据[4]。数据来源及处理方法见表1。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务估算 根据研究区自身特点及数据的可获得性，本文选取土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种服务作为研究区主要的生态系统服务类型，1986年和2015年各服务计算方法均一致。其中，土壤保持服务是指森林草地等地表植被能防止与减少土壤侵蚀的功能，基于InVEST模型进行估算，基本原理是利用气象数据、土壤数据等计算潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量，差值即为土壤保持量；产水量是指某一区域在单位时段内单位面积所产生的水量，在气候调节和水资源供给等方面作用显著，同样基于InVEST模型进行估算，以水量平衡原理为基础，以栅格为单元定量估算不同景观类型的水源供给能力[17-18]；植被生产能力强弱由植被NPP基于CASA模型进行估算[19]；防风固沙服务是生态系统植被对风沙的阻挡作用，基于RWEQ模型进行估算，通过潜在固沙量和实际固沙量之差估算固定沙粒的重量[20]。

1.3.2 热点分析 生态系统服务提供热(冷)点可以认为是区域内1种或多种生态系统服务提供能力相对较强(较弱)的区域[3]，了解生态系统服务热点区域可进一步明晰各种生态系统服务之间的空间规律，进而对生态系统重点保护区划提供参考。本文基于ArcGIS Getis-Ord G_i^*工具对各服务进行热(冷)点分析[21]，识别各服务相对于平均值来说的热(冷)点区域，具体公式如下：

$$G^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{ij} - \bar{a}\sum_{i=1}^{n} Q_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i^2}{n} - a^{-2}}\sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^{n} Q_{ij}^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} Q_{ij}\right)^2\right]}{n-1}}} \tag{1}$$

式中：G^*为热(冷)点单元值；a_i为单元i的属性值；Q_{ij}为权重矩阵；n为总单元数；a为地理空间单元；$\bar{a}$为所有地理空间单元生态系统服务总量的平均数。

表1 数据来源及处理方法

Tab. 1 Data sources and processing methods

数据类型	数据来源	分辨率/m	年份	处理方法
DEM高程数据	中科院资源环境科学与数据中心	30	2000	ArcGIS裁剪填洼流向分析与修正
降水、气温等气象数据	中国气象数据共享服务网	30	1986、2015	ArcGIS反距离权重插值
土壤数据	寒区旱区科学数据中心	1000	2009	ArcGIS提取属性计算
土地利用数据	中科院资源环境科学与数据中心	30	1986、2015	ArcGIS提取、裁剪

2 结果与分析

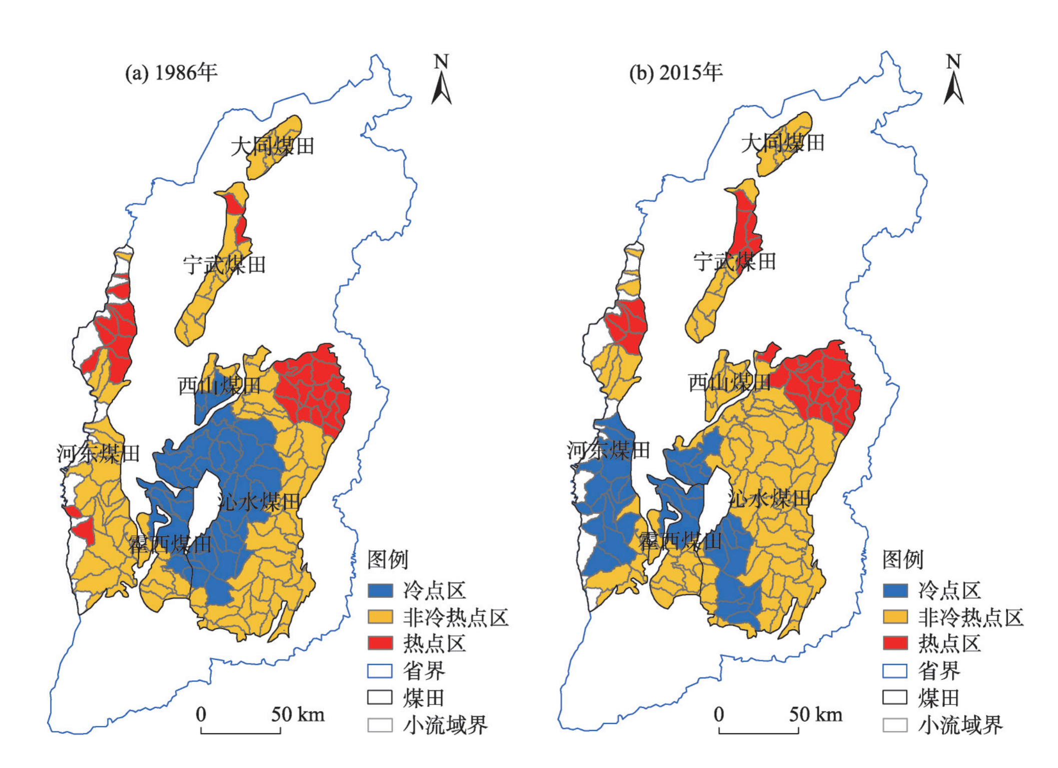
2.1 单项生态系统服务热(冷)点空间格局

1986年土壤保持服务热点区分布在河东煤田北部、沁水煤田东北部和宁武煤田北部局部，占研究区面积的18.54%，冷点区集中在西山煤田南部、霍西煤田北部和沁水煤田西部，占研究区面积的25.17%。2015年土壤保持服务热点区分布在宁武煤田北部、河东煤田北部和沁水煤田东北部，占研究区面积的18.54%，冷点区分布于河东煤田南部、霍西煤田北部和沁水煤田南部，占研究区面积的23.84%。整体来看，1986—2015年土壤保持服务热点区所占面积比例未变化，空间分布整体也未出现较大的变动，冷点区所占面积有所减少，空间分布主要从中南部向西南部转移(图1)。

1986年产水量服务热点区主要分布在沁水煤田东北部和东南部，占研究区面积的17.88%，冷点区主要分布在西山煤田、霍西煤田北部和沁水煤田西部，占研究区面积的19.87%。2015年产水量的热点区分布沁水煤田东部和河东煤田北部，占研究区面积的26.49%。冷点区分布在大同煤田北部、河东煤田中南部、霍西煤田和沁水煤田西部，占研究区面积的33.77%。整体来看，1986—2015年产水量服务热点区所占面积有所增加，在研究区东部增加比较明显，冷点区所占面积有所增加，空间分布主要从中部向西南部增多(图2)。

1986年植被生产热点区分布在河东煤田南部和沁水煤田东南部，占研究区面积的18.54%，冷点区主要分布在宁武煤田南部、西山煤田大部、沁水煤田西北部，占研究区面积的17.22%。2015年植被生产热点区分布在沁水煤田大部，占研究区面积的25.17%。冷点区分布在大同煤田、宁武煤田北部和河东煤田大部，占研究区面积的23.84%。整体来看，1986—2015年植被生产服务热点区所占面积有所增加，空间分布整体由沁水煤田东南部向东北部移动，冷点区所占面积有所增加，空间分布主要从中部向西部和北部转移(图3)。

1986年防风固沙服务热点区主要分布在河东煤田中部和北部、宁武煤田大部，占研究区面积的15.23%，冷点区主要分布在沁水煤田中部和东北部，占研究区面积的12.58%。2015年防风固沙热点区零散的分布于大同煤田大部、宁武煤田中南部、沁水煤田东北部和中部，占研究区面积的19.87%。冷点区分布于河东煤田中南部、霍西煤田大部、沁



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作。下同。

图1 1986年和2015年土壤保持服务热(冷)点空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of hotspots (coldspots) of soil conservation service in 1986 and 2015

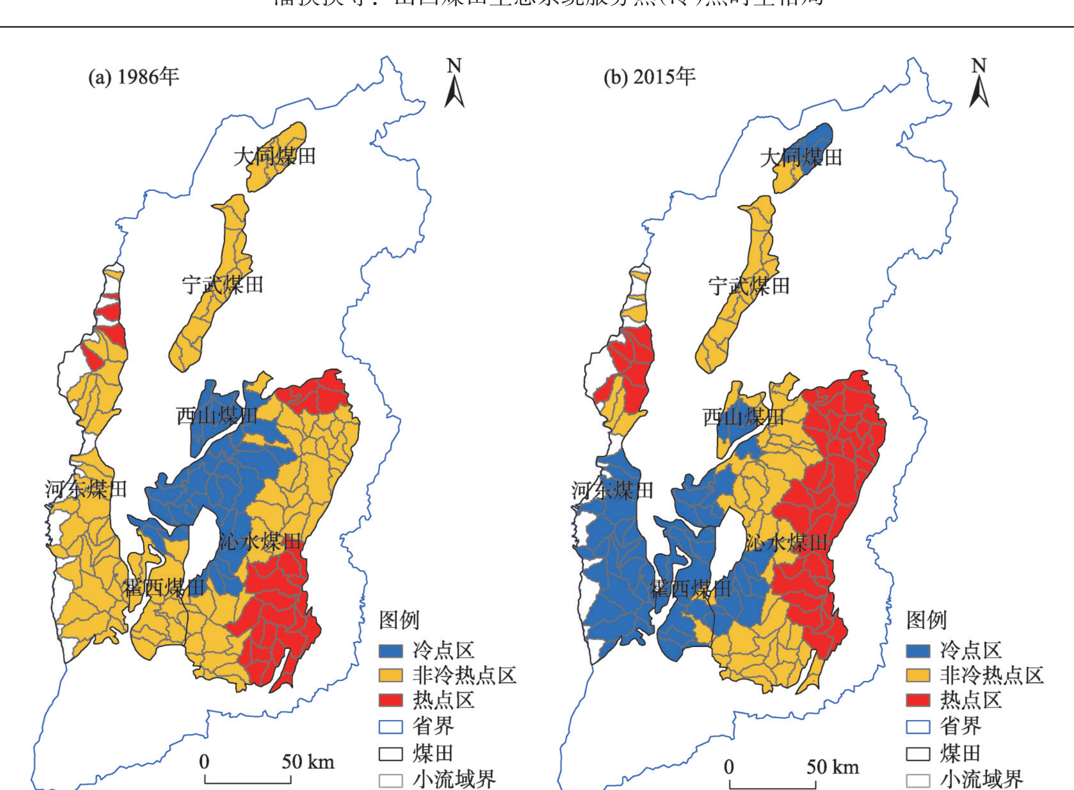


图2 1986年和2015年产水量服务热(冷)点空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of hotspots (coldspots) of water yield in 1986 and 2015

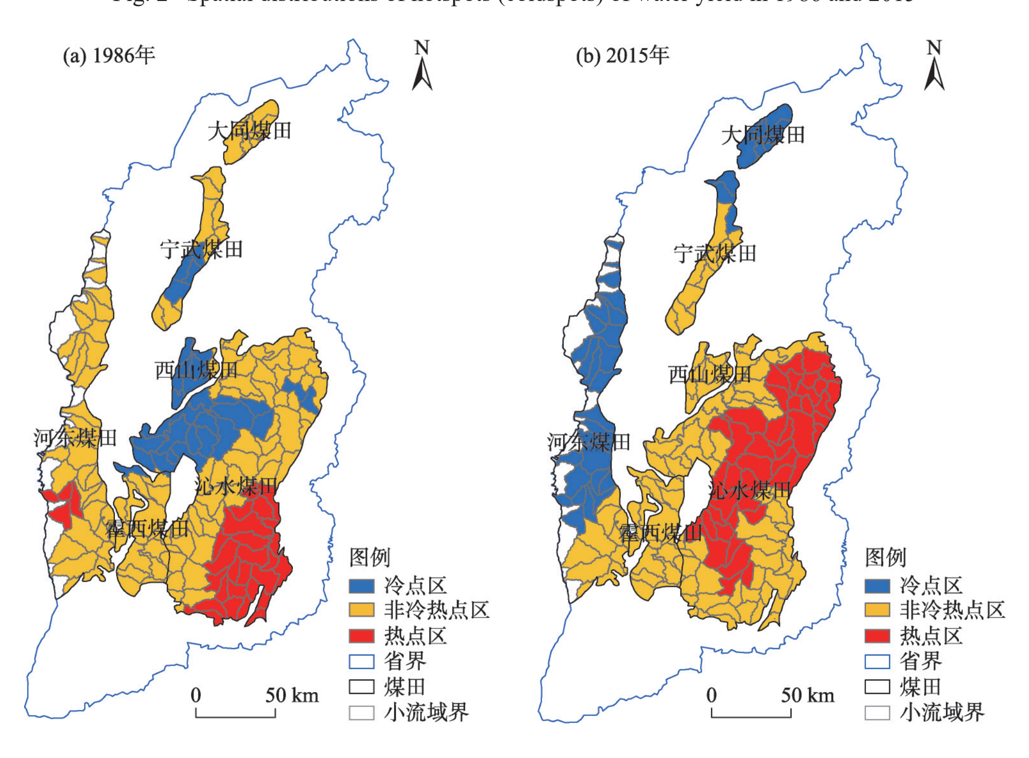


图3 1986年和2015年植被生产服务热(冷)点空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of hotspots (coldspots) of NPP in 1986 and 2015

水煤田南部局部，占研究区面积的18.54%。整体来看，1986—2015年防风固沙服务热点区所占面积也有所增加，空间分布整体由西北部向东南部转移，冷点区所占面积有所增加，空间分布主要从东南部向西南部转移(图4)。

2.2 多重生态系统服务热(冷)点空间格局

多重生态系统服务热(冷)点采用ArcGIS叠加分析得到，结果如下：

1986年0个服务热点区占研究区面积的54.30%,2015年0个服务热点区占研究区总面积的50.99%;1986年1个服务热点区主要分布于宁武煤田北部、河东煤田中部、沁水煤田东北部和东南部,占研究区面积的23.18%,2015年1个服务热点区主要分布于大同煤田中北部、宁武煤田北部及中南部、河东煤田局部、沁水煤田中南部,占研究区面积的25.83%;1986年2个服务热点区主要包括河东煤田北部、沁水煤田东北部和东南部,占研究区面积的21.19%,2015年2个服务热点区主要包括河东煤田北部、沁水煤田中部,占研究区面积的11.92%;1986年3个服务热点区较少,包括河东煤田北部,占研究区面积的1.33%,2015年3个服务热点区包括沁水煤田东北部,占研究区面积的2.65%;1986年无4个服务热点区,2015年4个服务热点区位于沁水煤田东北部,占研究区面积的8.61%。整体来看,1986—2015年研究区1个生态系统服务热点区所占面积有所增加,东南部增加较为明显;2个生态系统服务热点区所占面积减少较多,东南部减少较为明显;3个生态系统服务热点区所占面积有所增加,东部增加较为明显;4个生态系统服务热点区所占面积从无到有增加,东部增加较为明显,沁水煤田属于重点生态功能利用区(图5)。

1986年0个服务冷点区占研究区面积的62.25%,2015年0个服务冷点区占研究区面积的49.67%;1986年1个服务冷点区主要位于宁武煤田南部、霍西煤田北部和沁水煤田中北部和中南部,占研究区面积的16.56%,2015年1个服务冷点区主要位于大同煤田南部、宁武煤田北部、河东煤田北部、西山煤田中部、霍西煤田南部和沁水煤田南部,占研究区面积的23.84%;1986年2个服务冷点区主要位于西山煤田北部、霍西煤田北部、沁水煤田局部,占研究区面积的7.28%,2015年2个服务冷点区主要位于大同煤田北部、河东煤田南部、霍西煤田中南部、沁水煤田西南部,占研究区面积的11.26%;1986年3个服务冷点区主要位于西山煤田南部、沁水煤田西部,占研究区面积的13.91%,2015年3个服务冷点区主要位于霍西煤田中北部、沁水煤田西部,占研究区面积的5.96%;1986年无4个服务冷点区,2015年4个服务冷点区主要位于河东煤田中南部,占研究区面积的9.27%。整体来看,1986—2015年研究区1个生态系统服务冷点区所占面积有所增加,西部增加较为明显;2个生态系统服务冷点区所占面积有所增加,南部增加较为明显;3个生态系统服务冷点区所占面积有所减少,中部减少较为明显;4个生态系统服务冷点区所占面积从无到有增

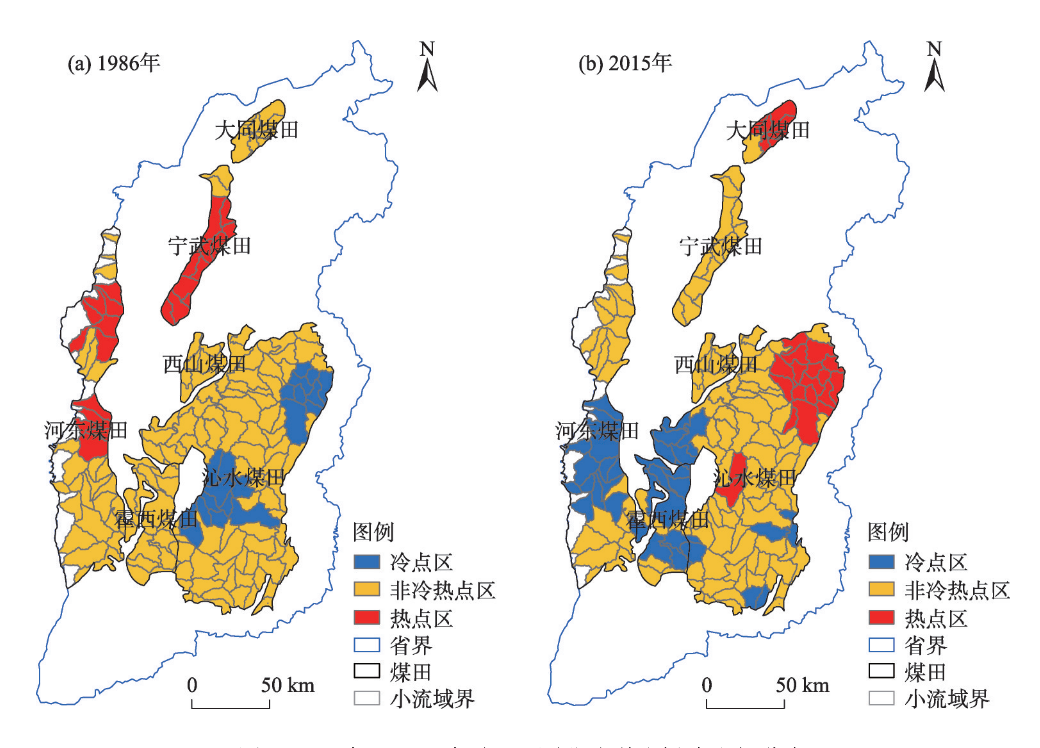


图4　1986年和2015年防风固沙服务热(冷)点空间分布

Fig. 4　Spatial distributions of hotspots (coldspots) of fixation service in 1986 and 2015

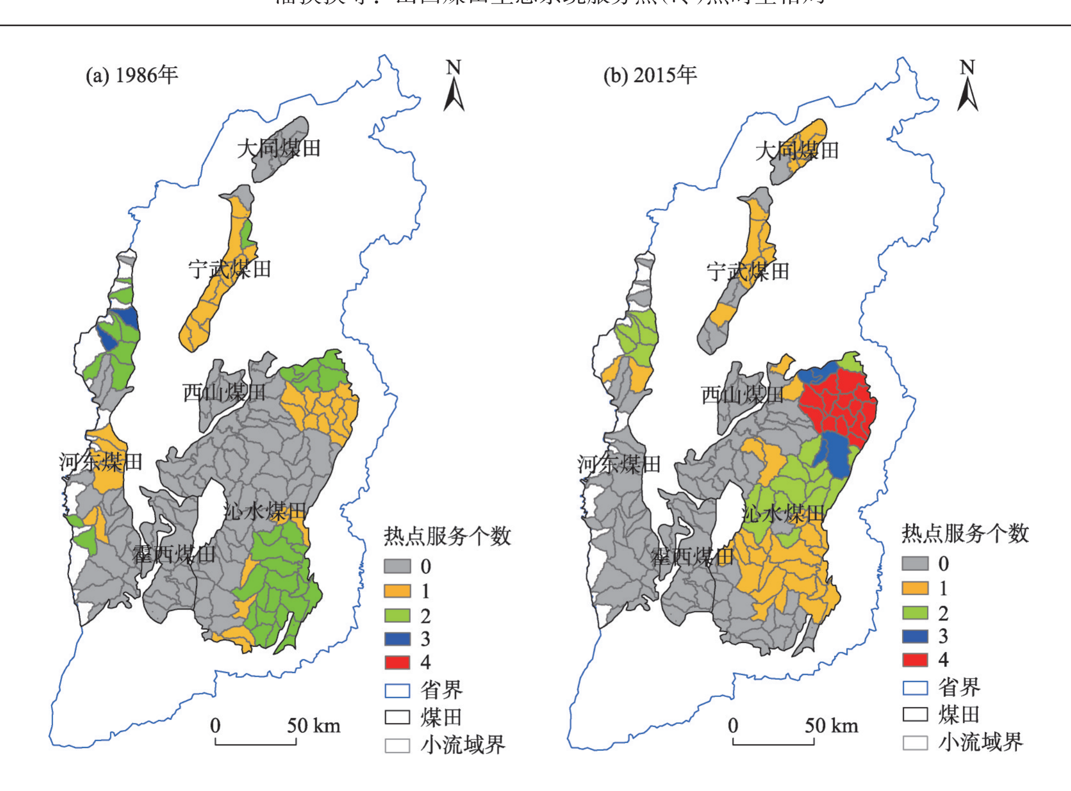


图5 1986年和2015年多重生态系统服务热点空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of hotspots in ecosystem services in 1986 and 2015

加,主要在西部(图6)。

2.3 不同土地利用类型生态系统服务热(冷)点比较

研究区不同土地利用类型的4种生态系统服务的热(冷)点分布情况如图7所示。1986年耕地土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种生态系统服务的热点区面积占比分别为11.74%、20.69%、20.84%、13.41%,其中,耕地的植被生产服务热点面积最高;冷点面积占比分别为29.96%、22.51%、18.61%、8.02%,其中,土壤保持服务冷点面积占比最大。林地土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种生态系统服务的热点区面积占比分别为16.57%、15.58%、15.79%、8.33%。其中,林地的土壤保持服务热点面积最大;冷点面积占比分别为33.86%、24.73%、16.58%、23.82%,土壤保持服务冷点面积最大。草地土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种生态系统服务的热点区面积占比分别为19.59%、11.88%、10.09%、16.20%,其中,草地的土壤保持服务热点面积最高;冷点面积占比分别为24.08%、17.23%、17.69%、10.58%,其中,土壤保持服务冷点面积最大。建设用地土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种生态系统服务的热点区面积占比分别为8.32%、22.08%、19.32%、3.81%,建设用地的产水量服务热点面积最大;冷点面积占比分别为31.14%、37.09%、22.51%、3.31%,其中,产水量服务冷点面积占比最大。

2015年耕地土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种生态系统服务的热点区面积占比分别为12.14%、28.29%、19.32%、9.15%,其中,耕地的产水量服务热点面积最高;冷点面积占比分别为21.58%、34.20%、18.10%、25.14%,其中,产水量服务冷点面积占比最大。林地土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种生态系统服务的热点区面积占比分别为17.86%、27.73%、42.89%、23.11%,其中,林地的植被生产热点面积最大;冷点面积占比分别为24.34%、32.63%、11.36%、7.31%,其中,产水量服务冷点面积占比最大。草地土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种生态系统服务的热点区面积占比分别为17.50%、29.04%、29.93%、21.45%,其中,草地的植被生产服务热点面积最高;冷点面积占比分别为31.16%、35.35%、27.06%、27.02%,其中,产水量服务冷点面积占比最大。建设用地土壤保持、产水量、植被生产和防风固沙4种生态系统服务的热点区面积占比分别为16.90%、21.99%、

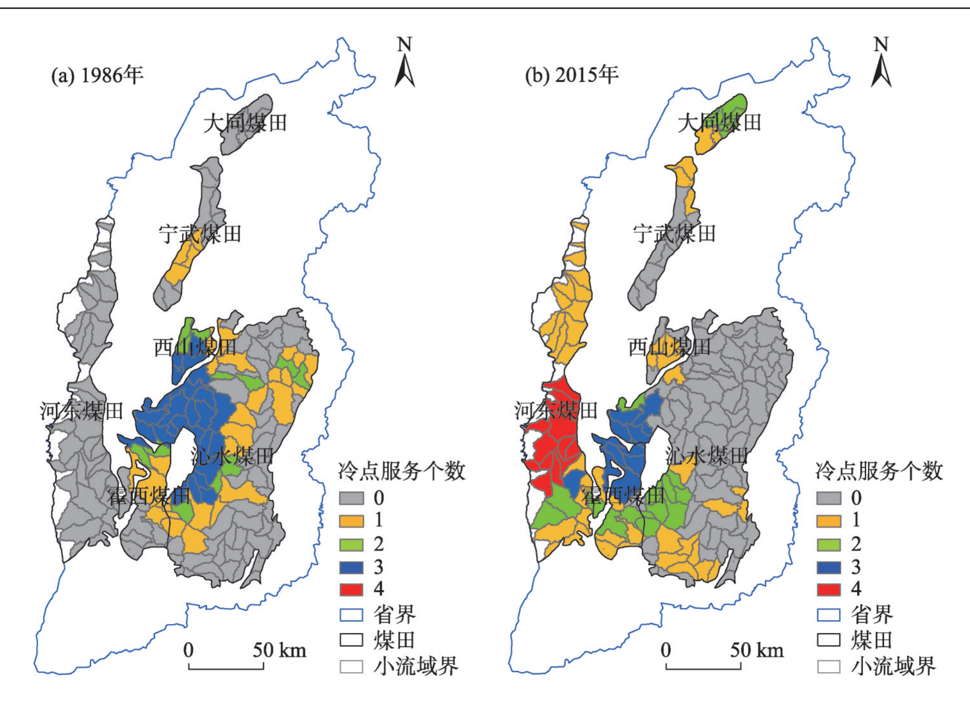


图6　1986年和2015年多重生态系统服务冷点空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of coldspots in ecosystem services in 1986 and 2015

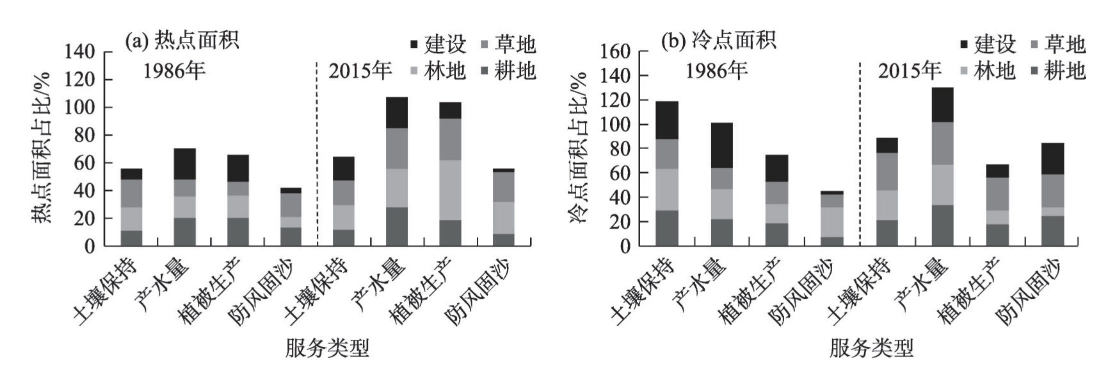


图7　不同土地利用类型生态系统服务热(冷)点面积占比

Fig. 7　Proportion of hotspots (coldspots) areas of ecosystem services in different land use types

11.06%、1.80%，其中，建设用地的产水量服务热点面积最大；冷点面积占比分别为12.43%、28.44%、10.73%、24.95%，其中，产水量服务冷点面积占比最大。

1986—2015年，耕地土壤保持和产水量热点面积占比增加，植被生产服务和防风固沙服务热点面积占比减小，产水量和防风固沙服务冷点面积占比增加，土壤保持服务和植被生产服务冷点面积占比减小；林地4种生态系统服务热点面积占比均有所增加，除产水量服务冷点面积占比增加外，其他3种服务冷点面积占比均减小；草地除土壤保持服务热点面积占比减小外，其他3种服务热点面积占比均增加，冷点面积占比4种服务均增加；建设用地除土壤保持服务热点面积占比增加外，其他3种服务热点面积占比均减小，冷点面积占比除防风固沙服务增加外，其他3种服务均减小。

3　讨 论

煤田受人为扰动影响，如矿产资源开采、矿区土地复垦、退耕还林还草工程等人类土地利用活动[6]，还受自然条件影响，比如气候变化通过直接改变气温和降水水平对生物群落产生影响，从而进一步影响其生态系统功能和服务[22-23]。土地利用变化也会影响生态系统的组成和结构，从而引起碳循环、水循环和其他生物物理过程的变化，并最终改变生态系统服务的供应水平[24]。热点分析恰好可以有针

对性地识别供给能力高低的区域，本研究得到的4种生态系统服务的热(冷)点空间分布情况具有差异性。从自然地理条件来看，研究区北部与南部由于纬度差异，气候差异明显，北部多风沙，气温偏低，降水量相对较少，南部相反，使得南部煤田的植被生产功能普遍优于北部，因此南部森林草地覆盖多，植被覆盖度大，水热条件好，是热点聚集地[15]。就土地利用类型而言，植被覆盖高的区域各项服务水平也较高，尤其相对于草地和耕地，林地具有更高的生物多样性和水土保持功能[6,25]，因此林地分布广泛的南部地区也相应成了热点分布区。对于冷点区而言，如娜仁等[16]所述由于煤炭开采直接破坏地表土层和植被等，保持土壤、水文调节等功能较低，因此成为冷点区。研究区多重生态系统服务热点区对其应集中利用与保护，而多重服务冷点区，对其应加大固土固沙、植树造林等生态建设活动，改善生态条件，更好的服务于人类。

本文比较系统的研究了山西6大煤田生态系统服务热(冷)点的空间分布格局，识别了生态系统服务的高低功能区并且探讨了造成其空间差异的因素，但是在生态可持续发展方面想要全面了解多种生态系统服务之间的关系目前还是一个挑战，对于生态系统服务估算由于各种原因缺乏实测数据，基于模型估算还存在一定的精度问题，而且由于生态系统服务之间的关系错综复杂，本研究只分析了有限数量的生态系统服务的热(冷)点空间格局，不同区域的不同生态系统服务存在自然地理条件差异、人类活动等多种因素交互影响，因此所得结果会有所差异，对其更为全面深入的了解还需更精细尺度上的调查研究。

4 结 论

为了解人为扰动较大的煤田生态系统服务高低的空间分布，对煤田生态保护或重点生态恢复区域的确定提供科学依据，本文对山西煤田生态系统服务采用ArcGIS热点分析和空间分析方法从单项和多重生态系统服务热(冷)点以及不同土地利用方式角度，揭示了研究区1986年和2015年土壤保持、产水量、植被生产、防风固沙4种生态系统服务的热(冷)点空间分布格局及其变化，得出以下结论：

(1) 1986—2015年，单项生态系统服务热(冷)点随服务特征、气候和人类活动影响空间分布变化较为明显。多重生态系统服务热点区主要集中分布在沁水煤田，为重点生态系统服务功能利用区，多重服务冷点区集中在研究区西南部。

(2) 耕地产水量和植被生产服务水平较高，林地和草地属于土壤保持服务高功能区，建设用地的产水量服务水平较高。

(3) 煤田生态系统服务的时空格局及其变化主要与土地利用等人为干扰活动和地表覆被情况紧密相关。因此，应采取土地利用可持续发展战略，实现煤田区域土地利用与生态系统服务的高效耦合。

参考文献(References)

[1] Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington DC: Island Press, 1997.

[2] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387 (6630): 253-260.

[3] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 等. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 823-834. [Wang Zhuangzhuang, Zhang Liwei, Li Xupu, et al. The spatial-temporal pattern of hotspots and coldspots of ecosystem services at the watershed scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 823-834.]

[4] Cao Y, Cao Y, Li G Y, et al. Linking ecosystem services trade-offs, bundles and hotspot identification with cropland management in the coastal Hangzhou Bay area of China[J]. Land Use Policy, 2020, 97: 104689, doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104689.

[5] Gurung K, Yang J, Fang L. Assessing ecosystem services from the forestry-based reclamation of surface mined areas in the north Fork of the Kentucky River Watershed[J]. Forests, 2018, 9(10): 652.

[6] 龙精华. 鹤岗矿区生态系统服务评估与权衡研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017. [Long Jinghua. The study on evaluation and tradeoff of ecosystem services in the Hegang mining area[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017.]

[7] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(1): 86-99.

[8] Xu S N, Liu Y F. Associations among ecosystem services from local perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2019, 690 (10): 790-798.

[9] Fernandez-Campo M, Rodríguez-Morales B, Fjellstad W, et al. Ecosystem services mapping for detection of bundles, synergies and trade-offs: Examples from two Norwegian municipalities[J]. Ecosystem Services, 2017, 28: 283-297.

[10] Costanza R, Groot R D, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.

[11] Chen M Q, Lu Y F, Ling L, et al. Drivers of changes in ecosystem service values in Ganjiang upstream watershed[J]. Land Use Policy, 2015, 47: 247-252.

[12] Jiang W, Lü Y H, Liu Y X, et al. Ecosystem service value of the Qinghai-Tibet Plateau significantly increased during 25 years[J]. Ecosystem Services, 2020, 44: 101146, doi: 10.1016/j.ecoser.2020.101146.

[13] He S, Su Y, Shahtahmassebi A R, et al. Assessing and mapping cultural ecosystem services supply, demand and flow of farmlands in the Hangzhou metropolitan area, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 692: 756-768.

[14] 巩杰, 徐彩仙, 燕玲玲, 等. 1997—2018年生态系统服务研究热点变化与动向[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3265-3276. [Gong Jie, Xu Caixian, Yan Lingling, et al. A critical review of progresses and perspectives on ecosystem services from 1997 to 2018 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3265-3276.]

[15] 万伦来, 杨峻, 周紫凡, 等. 煤炭资源型城市生态系统服务功能的时空变化特征分析——来自2006—2015年安徽省淮南市的经验证据[J]. 环境科学学报, 2018, 38(8): 3322-3328. [Wan Lunlai, Yang Jun, Zhou Zifan, et al. Analysis on spatial-temporal change characteristics of ecosystem service function in coal resource-based cities: Empirical evidence from Huainan City of Anhui Province over 2006—2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38 (8): 3322-3328.]

[16] 娜仁, 李康玮, 万伦来, 等. 淮北市煤炭开采与生态系统服务耦合度研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(12): 2048-2056. [Na Ren, Li Kangwei, Wan Lunlai, et al. Coupling of coal mining and ecosystem service: Evidence from Huaibei in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(12): 2048-2056.]

[17] 窦苗. 基于InVEST模型的横断山区产水功能时空变化及其影响因素研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018. [Dou Miao. The study of spatial and temporal variation of water production function and its influencing factors in the Hengduan Mountain region based on InVEST model[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.]

[18] Zhang J, Li X M, Buyantuev A. How do trade-offs and synergies between ecosystem services change in the Long Period? The case study of Uxin, Inner Mongolia, China[J]. Sustainability, 2019, 6041 (11): 1-19.

[19] 秦景秀, 郝兴明, 张颖, 等. 气候和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 117-124. [Qin Jingxiu, Hao Xingming, Zhang Ying, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation productivity in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 117-124.]

[20] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 等. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5857-5873. [Xu Jie, Xiao Yu, Xie Gaodi, et al. Assessment of wind erosion prevention service and its beneficiary areas identification of national key ecological function zone of windbreak and sand fixation type in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5857-5873.]

[21] 戴路炜, 唐海萍, 张钦, 等. 北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2863-2875. [Dai Luwei, Tang Haiping, Zhang Qin, et al. The trade off and synergistic relationship among ecosystem services: A case study in Duolun County, the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2863-2875.]

[22] 祁宁, 赵君, 杨延征, 等. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2827-2837. [Qi Ning, Zhao Jun, Yang Yanzheng, et al. Quantifying ecosystem service trade-offs and synergies in northeast China based on ecosystem service bundles[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2827-2837.]

[23] 岳辉, 刘英. 近15 a陕西省植被时空变化与影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 314-323. [Yue Hui, Liu Ying. Vegetation spatiotemporal variation and its driving factors of Shaanxi Province in recent 15 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 314-323.]

[24] 许丁雪, 吴芳, 何立环, 等. 土地利用变化对生态系统服务的影响——以张家口—承德地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7493-7501. [Xu Dingxue, Wu Fang, He Lihuan, et al. Impact of land use change on ecosystem services: Case study of the Zhangjiakou-Chengde area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7493-7501.]

[25] 孙庆祥, 周华荣. 阿尔泰山森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1327-1336. [Sun Qingxiang, Zhou Huarong. The service function and value evaluation of Altai Mountain forest ecosystem[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1327-1336.]

Spatiotemporal pattern of hotspots (coldspots) of ecosystem services in coalfields of Shanxi Province

PAN Huanhuan[1], WU Shurong[1], YANG Qixue[2], DU Ziqiang[1],
WU Zhitao[1], ZHANG Hong[2]

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. College of Environmental and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

Abstract: Hotspot analysis can be used to identify spatial clusters of high (or low) value to ecosystem services (ES) in a study area, helping to further explore study areas with a relatively high or low value of each ES. As one application, this is of great significance to the protection and restoration of the ecological environment in coalfields. In this study, we collected remote sensing data, meteorological data, and soil data (as well as data of other types) from coalfields in Shanxi Province, China from 1986 and 2015 and estimated the soil conservation and water yield using the integrated valuation of ES and trade-offs (InVEST) model, the vegetation net primary productivity based on the Carnegie-Ames-Stanford approach, and the sand fixation service based on the revised wind erosion equation. Furthermore, we identified the spatial distribution of hotspots (and coldspots) of ES using the Getis-Ord G_i^* tool of ArcGIS. The results demonstrated the following: (1) From the perspective of individual ES, the overall spatial distribution of hotspots for soil conservation service did not significantly change from 1986 to 2015, whereas the coldspots of the soil conservation service were mainly transferred from Qinshui Coalfield and Huoxi Coalfield to the Hedong Coalfield. The hotspots of water yield also increased significantly in the eastern part of Qinshui Coalfield, whereas the coldspots of water yield increased mainly in the southern part of Hedong Coalfield. Overall, the hotspots of vegetation production service moved from the south to the northeast of Heqinshui Coalfield, whereas the coldspots of vegetation production service mainly moved from Xishan Coalfield and Qinshui Coalfield to Hedong Coalfield and the Datong Coalfield. The hotspots of sand fixation service transferred from the northwest to the southeast as a whole, and the coldspots of sand fixation service mainly transferred from Qinshui Coalfield to Huoxi Coalfield and the Hedong Coalfield. (2) From the perspective of multiple ES, from 1986 to 2015, Qinshui Coalfield in the southeastern part of the study area, which belongs to the key ecosystem service function supply area, was a hotspot of multiple ecosystem services. Hedong Coalfield and Huoxi Coalfield were also coldspots of multiple ES. (3) From the perspective of different land use types, the hotspots of water yield and vegetation production of cultivated land accounted for a relatively high proportion, meaning their level of service was stronger than those of other services. The hotspots of soil conservation service for forest land and grassland also accounted for the largest proportion of hotspots, meaning the level of soil conservation was high, whereas the water yield of construction land was relatively high. The spatial distribution of ES in coalfields and their changes in terms of hotspots and coldspots were closely related to land use. Accordingly, maintaining a good coupling state between land use and ES will be helpful to provide a scientific basis for regional ecological reconstruction and the sustainable development of coalfields.

Key words: coalfields; ecosystem services; hot spot analysis; land use; spatial pattern